المرجع الهندسي الشامل

دورة التبريد وأنظمة التبريد

Refrigeration Cycle & Refrigeration Systems

القسم الأول: المقدمة والمفاهيم الأساسية

Introduction & Fundamental Concepts

1.1 ما هو التبريد؟ — What is Refrigeration?

التبريد [Refrigeration] هو العملية الهندسية التي يُزال فيها الحرارة من مكان أو مادة أو فضاء مغلق بهدف خفض درجة حرارته إلى مستوى أقل من درجة حرارة المحيط، والحفاظ عليه عند هذه الدرجة المنخفضة.

هذا يعني أن التبريد يخالف الاتجاه الطبيعي لانتقال الحرارة. بحسب **القانون الثاني للديناميكا الحرارية [Second Law of Thermodynamics]**، تنتقل الحرارة دائماً من المناطق الأعلى حرارة إلى الأقل حرارة. لكي ننقل الحرارة في الاتجاه العكسي، نحتاج إلى **عمل خارجي [External Work]** — وهو ما يوفره الضاغط [Compressor] في أنظمة التبريد بالضغط البخاري [Vapor Compression Refrigeration].

التعريف الهندسي الدقيق: التبريد هو عملية نقل الطاقة الحرارية [Thermal Energy Transfer] من وسط منخفض الحرارة إلى وسط مرتفع الحرارة بواسطة طاقة ميكانيكية أو حرارية خارجية، وفقاً لمبادئ الديناميكا الحرارية.

1.2 التطور التاريخي للتبريد — Historical Development

السنة	الحدث / Milestone	الأهمية الهندسية
1755	يُثبت أول William Cullen — د. وليام كولن تبريد اصطناعي باستخدام ضخ الهواء على الإيثر	إثبات مبدأ التبريد بالتبخر
1834	يسجّل براءة Jacob Perkins — جاكوب بيركنز اختراع أول دورة تبريد بخارية ضاغطة عملية	الأساس الهندسي لكل مبردات اليوم
1856	يُنتج James Harrison — جيمس هاريسون أول ثلاجة تجارية في أستراليا	بداية التطبيق الصناعي
1876	يطوّر Carl von Linde — كارل فون ليندي دورة تبريد الأمونيا الصناعية	انطلاقة صناعة التبريد الكبيرة
1902	يخترع أول Willis Carrier — ويليس كاريير نظام تكييف هواء للرطوبة والحرارة	ولادة صناعة HVAC الحديثة
1930	Thomas Midgley — توماس ميدجلي يكتشف مبردات CFCs (الفريون)	ثورة مبردات آمنة وقابلة للضغط
1987	Montreal Protocol — بروتوكول مونتريال يُقيّد مبردات CFC/HCFC	بداية عصر المبردات الصديقة للبيئة
2000+	تطوير مبردات HFO وأنظمة CO_2 الطبيعية والأمونيا	عصر الاستدامة البيئية في التبريد

1.3 الفرق بين التبريد والتكييف — Refrigeration vs. Air Conditioning

المعيار / Criterion	التبريد / Refrigeration	تكييف الهواء / Air Conditioning
الهدف الأساسي	إزالة الحرارة من منتج أو فضاء لحفظه أو معالجته	التحكم في درجة الحرارة والرطوبة لراحة الإنسان

المعيار / Criterion	التبريد / Refrigeration	تكييف الهواء / Air Conditioning
نطاق درجات الحرارة	من -50°C إلى (تجميد عميق) 10+°C (تبريد عادي)	من 18°C إلى 26°C (راحة بشرية)
المبرد النموذجي	R717 (أمونيا)، R404A، CO_2، R134a	R410A، R32، R407C، R134a
التطبيقات	تبريد الأغذية، التجميد، تبريد العمليات الصناعية	تكييف المباني، المكاتب، المولات، الفنادق
الرطوبة	ليست العامل الرئيسي في التصميم غالباً	عامل تصميمي رئيسي — Humidity Control
المعدات الخاصة	غرف التبريد، الفريزرات، التبريد الانفجاري	المكيفات، الشيلرات، أنظمة VRF

1.4 مبدأ نقل الحرارة — Heat Transfer Principles

أ. التوصيل الحراري — Conduction

انتقال الطاقة الحرارية عبر مادة صلبة أو ساكنة دون حركة المادة نفسها.

معادلة قانون فوريه — Fourier's Law:

$$Q = -k \times A \times (\Delta T / L)$$

- Q = معدل انتقال الحرارة [W]
- k = معامل التوصيل الحراري [W/m·K]
- A = مساحة المقطع [m²]

- ΔT = فرق درجات الحرارة [K]
- L = سماكة المادة [m]

المادة / Material	معامل التوصيل k [W/m·K]	الاستخدام في التبريد
نحاس — Copper	385	أنابيب المبرد
ألومنيوم — Aluminum	205	زعانف المبادلات الحرارية
فولاذ — Steel	50	هياكل المعدات
فلين — Cork	0.04	عزل قديم
بولي يوريثان — Polyurethane Foam	0.022	عزل غرف التبريد الحديث
هواء — Air	0.026	عازل طبيعي منخفض الكفاءة

ب. الحمل الحراري — Convection

معادلة نيوتن للتبريد — Newton's Law of Cooling:

```
Q = h × A × (Ts - T∞)
```

- h = معامل الحمل الحراري [W/m²·K]
- Ts = درجة حرارة السطح
- T∞ = درجة حرارة المائع البعيد عن السطح

ج. الإشعاع الحراري — Radiation

قانون ستيفان-بولتزمان — Stefan-Boltzmann Law:

$$Q = \varepsilon \times \sigma \times A \times T^4$$

حيث $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$

1.5 التطبيقات الصناعية الواقعية — Real Industrial Applications

التطبيق / Application	نطاق درجة الحرارة	المبرد الشائع	ملاحظات هندسية
تكييف المباني — AC	+18°C إلى 26+°C	R410A, R32	السيطرة على الرطوبة عامل تصميمي حيوي
تبريد الأغذية — Cold Storage	0°C إلى 5+°C	R404A, R134a	HACCP compliance إلزامي
التجميد — Freezing	-18°C إلى 40-°C	R404A, R717	التحكم في معدل التجميد يؤثر جودة المنتج
التبريد الانفجاري — Blast Freezing	-35°C إلى 45-°C	R717, R404A	تبريد سريع جداً — حفاظ على خلايا الأغذية
تبريد صناعي — Industrial Process	-50°C إلى 10+°C	R717 (أمونيا)	كفاءة عالية — أحمال كبيرة — COP مرتفع

التطبيق / Application	نطاق درجة الحرارة	المبرد الشائع	ملاحظات هندسية
التبريد البحري — Marine Refrigeration	-25°C إلى 5+°C	R404A, R134a	مقاومة الاهتزاز والملوحة والحركة المستمرة
مراكز البيانات — Data Centers	+18°C إلى 27+°C	R410A, R134a	توفر عالٍ 99.999%، طاقة احتياطية
تخزين الأدوية — Pharma Storage	+2°C إلى 8+°C	R134a, R32	دقة متناهية — توثيق درجات الحرارة إلزامي
الشيلرات — Chilled Water Systems	+5°C إلى 12+°C	R134a, R1234ze	أنظمة ضخ كبيرة — توزيع مياه مبردة
ثلوج صناعية — Ice Making	-10°C إلى 15-°C	R404A, R717	جودة الثلج تعتمد على نقاء الماء والتحكم

القسم الثاني: أسس الديناميكا الحرارية

Thermodynamics Fundamentals

2.1 الحرارة — Heat (Q)

الحرارة هي شكل من أشكال الطاقة تنتقل بين الأجسام نتيجة اختلاف درجات حرارتها. وحدتها هي الجول [J] أو كيلو جول [kJ] أو BTU.

في الديناميكا الحرارية:

- عندما تُضاف إلى النظام **(+Q)** الحرارة **موجبة**

- عندما تُزال من النظام **(-Q)** الحرارة **سالبة**

2.2 درجة الحرارة — Temperature (T)

المقياس / Scale	الصيغة للتحويل	نقطة الصفر المطلق	الاستخدام الهندسي
Celsius (°C)	الأساس	-273.15°C	الاستخدام اليومي والهندسي في معظم الدول
Fahrenheit (°F)	°F = (°C × 9/5) + 32	-459.67°F	المستخدم في أمريكا الشمالية
Kelvin (K)	K = °C + 273.15	0 K (صفر مطلق)	الحسابات الديناميكية الحرارية والغازات
Rankine (R)	R = °F + 459.67	0 R	الحسابات الأمريكية في الهندسة الحرارية

2.3 الحرارة المحسوسة — Sensible Heat

الحرارة التي تُغيّر درجة حرارة المادة دون تغيير حالتها الفيزيائية.

$$Q = m \times Cp \times \Delta T$$

المادة	Cp [kJ/kg·K]
هواء جاف	1.005

المادة	Cp [kJ/kg·K]
ماء	4.187
سائل R134a	1.46
سائل R410A	1.72
ألومنيوم	0.897
نحاس	0.385

2.4 الحرارة الكامنة — Latent Heat

الحرارة التي تُغيّر حالة المادة الفيزيائية دون تغيير درجة حرارتها.

$$Q = m \times L$$

نوع التحول	المصطلح	الحرارة	مثال في التبريد
صلب → سائل	Melting	مضافة	ذوبان الجليد
سائل → صلب	Freezing	مُزالة	تجميد المنتجات
سائل → بخار	Vaporization	مضافة (كبيرة جداً)	**تبخر المبرد في المبخر**
بخار → سائل	Condensation	مُزالة (كبيرة جداً)	**تكثف المبرد في المكثف**

نوع التحول	المصطلح	الحرارة	مثال في التبريد
صلب → بخار	Sublimation	مضافة كبيرة جداً	التبريد بالجليد الجاف CO_2

> ⚠ **ملاحظة هندسية جوهرية:** الحرارة الكامنة للتبخر هي العملية القلب في دورة التبريد — المبرد يمتص كميات هائلة من الحرارة عند تبخره بدون تغيير في درجة حرارته.

2.5 الإنثالبي — Enthalpy (H)

$$H = U + PV$$

- U = الطاقة الداخلية [kJ]
- P = الضغط [Pa]
- V = الحجم [m³]

في الهندسة التطبيقية نستخدم الإنثالبي النوعي (h) بوحدة [kJ/kg].

2.6 الإنتروبيا — Entropy (S)

مقياس درجة الفوضى الجزيئي في نظام ما. تزداد في العمليات [Disorder] اللاعكوسية [Irreversible Processes].

2.7 علاقة الضغط بدرجة الحرارة — Pressure-Temperature Relationship

الضغط (Bar Gauge)	R134a — °C	R410A — °C	R717 (أمونيا) — °C	الموقع في الدورة
0 (ضغط جوي)	-26.4	-51.5	-33.3	ضغط منخفض جداً
3.0 Bar	-8.9	-37.8	-9.2	ضغط شفط R134a شائع
7.0 Bar	+17.1	-14.6	+17.8	ضغط شفط R410A شائع
15.0 Bar	+39.4	+14.4	+36.3	ضغط طرد شائع
25.0 Bar	+60.6	+37.5	+61.7	ضغط طرد مرتفع

2.8 الحرارة الفائقة والتبريد الفائق — Superheat & Subcooling

Superheat (SH)

```
SH = T_actual_vapor - T_saturation_at_suction_pressure
```

عند المبخر 5°C إلى 10 °Cالقيمة المثالية:

Subcooling (SC)

```
SC = T_saturation_at_condensing_pressure - T_actual_liquid
```

القيمة المثالية: 5 °C إلى 10 °C

الحالة	SH	SC	التشخيص
شحن صحيح	5 — 10°C	5 — 10°C	نظام سليم
شحن ناقص	> 15°C	< 3°C	نقص مبرد أو مسكّر TXV
شحن زائد	< 3°C أو صفر	> 15°C	فائض مبرد — خطر Liquid Slugging
فتح TXV زائد	< 3°C	طبيعي	إعادة ضبط أو استبدال
إغلاق TXV زائد	> 15°C	طبيعي	إعادة ضبط أو استبدال
مبخر متجمد	> 15°C	طبيعي	إذابة المبخر + فحص سبب التجمد

2.9 قوانين الغازات — Gas Laws

قانون بويل — Boyle's Law

$P_1V_1 = P_2V_2$ (عند درجة حرارة ثابتة)

قانون شارل — Charles's Law

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 \quad \text{(عند ضغط ثابت)}$$

قانون الغاز المثالي — Ideal Gas Law

$$PV = nRT$$

- P = الضغط المطلق [Pa]
- V = الحجم [m³]
- n = عدد المولات [mol]
- R = 8.314 J/mol·K
- T = درجة الحرارة المطلقة [K]

> **تنبيه:** قانون الغاز المثالي غير دقيق قرب منطقة الإشباع أو عند ضغوط عالية ⚠ يجب استخدام جداول خصائص المبرد في الحسابات الدقيقة —.

القسم الثالث: دورة التبريد بالضغط البخاري

Vapor Compression Refrigeration Cycle

3.1 نظرة عامة على الدورة — Cycle Overview

المرحلة	المكوّن الرئيسي	ما يحدث للمبرد	تغير الضغط	تغير درجة الحرارة
1. الضغط — Compression	الضاغط [Compressor]	بخار منخفض الضغط → بخار عالي الضغط محمّص	يرتفع ↑	يرتفع ↑
2. التكثيف — Condensation	المكثف [Condenser]	بخار عالي الضغط → سائل عالي الضغط	ثابت (عالٍ)	ينخفض ↓
3. التمدد — Expansion	صمام التمدد [Expansion Valve]	سائل عالي الضغط → خليط سائل-بخار	ينخفض ↓	ينخفض ↓
4. التبخر — Evaporation	المبخر [Evaporator]	خليط سائل-بخار → بخار منخفض الضغط	ثابت (منخفض)	ثابت (منخفض)

3.2 المرحلة الأولى: الضغط — Compression (1 → 2)

شغل الضاغط — Compressor Work:

$$W_{comp} = \dot{m}_{ref} \times (h_2 - h_1) \quad [kW]$$

الكفاءة الإيزنتروبية [Isentropic Efficiency]:

$$\eta_{is} = W_{ideal} / W_{actual} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1)$$

تتراوح بين **0.65 إلى 0.85** للضواغط التجارية.

المعلمة	عند الشفط / At Suction	عند الطرد / At Discharge
الحالة	بخار محمّص Superheated Vapor	بخار محمّص بدرجة أعلى بكثير
الضغط	منخفض (Suction Pressure)	عالٍ (Discharge Pressure)
الإنثالبي	h_1	$h_2 > h_1$
الكثافة	منخفضة (غاز منتفخ)	عالية (غاز مضغوط)

3.3 المرحلة الثانية: التكثيف — Condensation (2→3)

ثلاث مراحل متتالية في المكثف:

1. **Desuperheating:** البخار المحمّص يفقد الحرارة المحسوسة
2. **Condensation:** تحوّل البخار إلى سائل مع إطلاق الحرارة الكامنة
3. **Subcooling:** انخفاض درجة حرارة السائل تحت درجة الإشباع

$$Q_{cond} = \dot{m}_{ref} \times (h_2 - h_3) \quad [kW]$$

3.4 المرحلة الثالثة: التمدد — Expansion (3 → 4)

عملية **لاإنثالبية [Isenthalpic Process]:** الإنثالبي يبقى ثابتاً ($h_3 = h_4$).

نسبة البخار عند الدخول للمبخر:

$$x = (h_4 - h_f) / (h_g - h_f)$$

3.5 المرحلة الرابعة: التبخر — Evaporation (4 → 1)

$$Q_{evap} = \dot{m}_{ref} \times (h_1 - h_4) \quad [kW]$$

3.6 معامل الأداء — COP

$$COP_{Refrigeration} = Q_{evap} / W_{comp} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1)$$

نوع النظام	نطاق COP المتوقع
ثلاجة منزلية	1.2 — 1.8

نوع النظام	نطاق COP المتوقع
مكيف هواء	2.5 — 4.5
شيلر تجاري	3.5 — 6.5
شيلر مع Free Cooling	8.0 — 15+
نظام أمونيا صناعي	3.0 — 5.0
COP كارنو المثالي	COP_Carnot = T_L / (T_H - T_L) [K]

> ✦ **قاعدة جوهرية:** كلما صغر الفرق بين درجة التكثيف ودرجة التبخر، ارتفع الـ COP وانخفض استهلاك الطاقة.

3.7 مخطط الضغط-الإنثالبي — P-H Diagram

المنطقة	حالة المبرد
يسار القبة	Subcooled Liquid Region — سائل غير مشبع
تحت القبة	Two-Phase Region — خليط سائل+بخار
يمين القبة	Superheated Vapor Region — بخار محمّص
ذروة القبة	Critical Point

القراءات المباشرة من المخطط:

Refrigerating Effect = $h_1 - h_4$
Compressor Work = $h_2 - h_1$

Heat Rejection = $h_2 - h_3$

COP = $(h_1 - h_4) / (h_2 - h_1)$

القسم الرابع: المكوّنات الرئيسية

Main Components of Refrigeration Systems

4.1 الضاغط — Compressor

المعيار	التفاصيل الهندسية
السعة [Capacity]	بالطن تبريد [TR] أو kW
نسبة الضغط [Pressure Ratio]	P_discharge / P_suction (عادة < 10)
الكفاءة [Efficiency]	إيزنتروبية 65-85%، حجمية 70-90%
التزييت [Lubrication]	زيت مناسب للمبرد

4.2 المكثف — Condenser

نوع المكثف	وسيلة رفض الحرارة	المزايا	العيوب
Air-Cooled	الهواء الجوي	بسيط، لا يحتاج ماء	كفاءة أقل في الطقس الحار
Water-Cooled	ماء من برج تبريد	كفاءة أعلى، درجة تكثيف أقل	يحتاج ماء ومعالجة
Evaporative	تبخر الماء + الهواء	كفاءة عالية حتى في الطقس الحار	يحتاج معالجة ماء دقيقة

4.3 المبخر — Evaporator

نوع المبخر	التطبيقات
DX Evaporator (Direct Expansion)	مكيفات هواء، ثلاجات تجارية، AHU
Flooded Evaporator	شيلرات صناعية، تطبيقات كبيرة
Shell & Tube	شيلرات مركزية كبيرة
Plate Heat Exchanger	Chiller صغير ومتوسط
Fin & Tube Coil	وحدات التكييف، غرف التبريد

طرق إزالة الجليد — Defrost Methods:

طريقة الإذابة	التطبيق
Hot Gas Defrost	الأكثر شيوعاً — سريع وفعّال
Electric Defrost	بسيط وموثوق — أغلى تشغيلاً
Water Defrost	سريع جداً — يحتاج مصدر ماء
Off-Cycle Defrost	يُستخدم في المبخرات فوق 0°C فقط

4.4 صمامات التمدد — Expansion Devices

TXV (Thermostatic Expansion Valve)

مبدأ العمل:

1. Sensing Bulb يقيس درجة حرارة الشفط
2. ضغط البلبة يُفتح الصمام

3. يُقاوم الفتح Superheat Setting ضغط الشفط + نابض الـ
4. ارتفاع SH ← الصمام يفتح أكثر
5. انخفاض SH ← الصمام يُغلق

مقارنة TXV و EEV:

المعيار	TXV الميكانيكي	EEV الإلكتروني
دقة التحكم	متوسطة	±0.1°C
سرعة الاستجابة	ثوانٍ	أجزاء من الثانية
مرونة التشغيل	ثابتة	برمجة مرنة
التوافق مع VRF	لا	نعم — أساسي
الكفاءة	جيدة	ممتازة

الأنبوب الشعري — Capillary Tube

لا أجزاء متحركة. يُستخدم في الثلاجات المنزلية ومكيفات الغرفة الصغيرة. طول 0.5-6 m، قطر 0.5-2 mm.

4.5 المكوّنات المساعدة — Accessory Components

المكوّن	الوظيفة	موقعه	الفحص
Receiver	تخزين السائل	بعد المكثف	شهري
Accumulator	منع وصول السائل للضاغط	قبل الضاغط	شهري
Oil Separator	فصل الزيت وإعادته	بعد الضاغط	ربع سنوي

المكوّن	الوظيفة	موقعه	الفحص
Filter Drier	إزالة الرطوبة والمواد الصلبة	قبل الـ TXV	سنوي
Sight Glass	مراقبة حالة المبرد	بعد الـ Receiver	يومي
Solenoid Valve	إغلاق/فتح دفق المبرد	متعدد	شهري
Pressure Switch	حماية النظام من الضغط الخطير	High/Low Side	شهري
Check Valve	منع رجوع المبرد	متعدد	ربع سنوي

القسم الخامس: أنواع الضواغط

Compressor Types

5.1 الضاغط الترددي — Reciprocating Compressor

مراحل العمل:

1. شوط الشفط — يُسحب البخار
2. شوط الضغط — يرتفع الضغط
3. شوط الطرد — يُدفع البخار
4. التمدد المتبقي — Clearance Volume

المزايا	العيوب
نسبة ضغط عالية (حتى 10:1)	اهتزاز وضوضاء أعلى

العيوب	المزايا
قطع متحركة أكثر — صيانة أكثر	تكلفة أولية منخفضة
حساس لـ Liquid Slugging	مناسب لمجموعة واسعة من المبردات
—	قابلية الإصلاح في الموقع

أسباب الأعطال الشائعة:

- كسر صمامات الشفط/الطرد [Valve Failure]
- تآكل الحلقات المكبسية [Piston Ring Wear]
- صدم السائل [Liquid Slugging]
- ارتفاع درجة الحرارة [Overheating]
- مشاكل الزيت

5.2 الضاغط اللولبي — Scroll Compressor

لولبان متشابكان: Fixed Scroll + Orbiting Scroll. جيوب [Pockets] تتقلص تدريجياً من الخارج للداخل.

التفصيل	الخاصية
أعلى من الترددي بـ 5-15%	الكفاءة
منخفضة جداً	الضوضاء
عالية جداً — أجزاء متحركة أقل	الموثوقية
1 حتى 30 TR	نطاق السعة
صغيرة Split AC، Package Units، VRF، Chillers	التطبيقات

5.3 ضاغط البراغي — Screw Compressor

Male Rotor + Female Rotor. تحكم في السعة بـ Slide Valve (10% — 100%).

- السعة: 20 TR حتى 500+ TR
- كفاءة حجمية عالية جداً
- مناسب للتشغيل المستمر 24/7

5.4 الضاغط الطاردي المركزي — Centrifugal Compressor

Eye → Impeller → Diffuser.

- السعة: 300 TR — 10,000+ TR
- كفاءة عالية جداً عند Full Load
- حساس لـ Surge عند انخفاض الحمل

5.5 حماية الضاغط — Compressor Protection

نوع الحماية	السبب	وسيلة الحماية
High Discharge Pressure	مشكلة في المكثف	High Pressure Switch
Low Suction Pressure	نقص مبرد أو انسداد	Low Pressure Switch
Motor Overload	تيار زائد	Overload Relay
High Discharge Temperature	مرتفع — نقص SH زيت	Temperature Sensor + Trip

وسيلة الحماية	السبب	نوع الحماية
Oil Pressure Differential Switch	نقص الزيت	Low Oil Pressure
عنصر تسخين دائم	منع تمركز المبرد في الزيت	Crankcase Heater
مؤقت 3-5 دقائق	منع التشغيل المتكرر السريع	Anti-Short-Cycle Timer
Phase Monitoring Relay	فقدان إحدى الفازات	Phase Failure Protection

---

القسم السادس: المبردات — Refrigerants

6.1 خصائص المبرد المثالي

السبب	المتطلب المثالي	الخاصية
كمية مبرد أقل لنفس التبريد	عالية جداً	الحرارة الكامنة للتبخر
يمنع دخول الهواء والرطوبة	إيجابي فوق الضغط الجوي	الضغط عند درجات التشغيل
لا يتجمد في أبرد نقطة	منخفضة جداً	درجة حرارة التجمد
أمان التركيب والصيانة	غير قابل للاشتعال	قابلية الاشتعال
سلامة الأفراد	غير سام	السمية

السبب	المتطلب المثالي	الخاصية
متوافق مع اللوائح البيئية	ODP = 0 — GWP منخفض	ODP/GWP

6.2 تصنيف المبردات

الوضع الحالي	أمثلة	الوصف	الفئة
محظور كلياً	R11, R12, R113	كلور + فلور + كربون	CFC
في مرحلة الإلغاء	R22, R123	هيدروجين + كلور + فلور	HCFC
تنظيم Kigali	R134a, R410A, R407C	ODP = 0 — GWP مرتفع	HFC
الجيل القادم	R1234yf, R1234ze	ODP = 0 — GWP < 10	HFO
الأكثر استدامة	R717, R744, R290	ODP = 0 — GWP منخفض	Natural طبيعية

6.3 المبردات الأكثر استخداماً

الحالة	التطبيق	غليان °C	GWP	ODP	النوع	المبرد
محظور التصنيع	AC قديم	-40.8	1810	0.055	HCFC	R22

المبرد	النوع	ODP	GWP	غليان °C	التطبيق	الحالة
R134a	HFC	0	1430	-26.3	ثلاجات، سيارات	تنظيم Kigali
R410A	HFC Blend	0	2088	-51.5	مكيفات حديثة	تخفيض تدريجي
R407C	HFC Blend	0	1774	-43.7	بديل R22	تخفيض تدريجي
R32	HFC	0	675	-51.7	مكيفات جديدة	نامٍ
R404A	HFC Blend	0	3922	-46.5	تبريد تجاري	GWP عالٍ
R717 NH_3	Natural	0	0	-33.3	تبريد صناعي ضخم	آمن بيئياً — سام
R744 CO_2	Natural	0	1	-78.4	سوبر ماركت، سيارات	نامٍ بقوة
R290 Propane	Natural HC	0	3	-42.1	ثلاجات صغيرة	قابل للاشتعال
R1234yf	HFO	0	4	-29.5	تكييف سيارات	GWP منخفض جداً

6.4 شحن المبرد — Refrigerant Charging

المؤشر	شحن ناقص	شحن صحيح	شحن زائد
ضغط الشفط	منخفض	طبيعي	مرتفع قليلاً
ضغط الطرد	منخفض	طبيعي	مرتفع
Superheat	> 15°C	5 — 10°C	< 3°C (خطر!)
Subcooling	< 3°C	5 — 10°C	> 15°C
Sight Glass	فقاعات كثيرة	سائل نظيف	سائل نظيف
أداء التبريد	ضعيف	ممتاز	ضعيف
خطر على الضاغط	ارتفاع حرارة	آمن	Liquid Slugging

القسم السابع: الشيلرات — Chillers

7.1 Air-Cooled vs Water-Cooled Chiller

المعيار	Air-Cooled	Water-Cooled
رفض الحرارة	الهواء الجوي	برج تبريد
الكفاءة COP	2.5 — 3.5	4.0 — 7.0
السعة	10 — 500 TR	100 — 10,000+ TR
التركيب	أبسط	أعقد
التكلفة الأولية	أقل	أعلى
تكلفة التشغيل	أعلى	أقل

7.2 دورة المياه المبردة — Chilled Water Cycle

المعلمة	القيمة الاعتيادية
Chilled Water Supply Temp	6°C — 7°C
Chilled Water Return Temp	12°C — 13°C
Condenser Water Supply	29°C — 30°C
Condenser Water Return	35°C
معدل تدفق Chilled Water	0.172 L/s per kW
معدل تدفق Condenser Water	0.215 L/s per kW

7.3 أبراج التبريد — Cooling Towers

النوع	الوصف	المزايا
Counter-Flow	الهواء يصعد — الماء ينزل	كفاءة أعلى
Cross-Flow	الهواء أفقياً	أبسط وأسهل صيانة
Induced Draft	مروحة في القمة	الأكثر شيوعاً

> ⚠ **تحذير:** معالجة مياه برج التبريد [Water Treatment] إلزامية. بدون معالجة: Scale — Legionella — Corrosion.

7.4 الشيلر الامتصاصي — Absorption Chiller

لا يستخدم ضاغطاً ميكانيكياً — يستخدم الحرارة كمصدر طاقة أساسي.

- زوج مذيب-مبرد: LiBr + ماء أو أمونيا (الأشيع) + ماء
- مناسب عندما تكون الكهرباء غالية والحرارة متوفرة

القسم الثامن: أنظمة VRF/VRV

Variable Refrigerant Flow Systems

8.1 مقارنة VRF بالشيلر

الخاصية	VRF/VRV	Chiller System
وسيط نقل الحرارة	مبرد مباشر	مياه مبردة
كفاءة الطاقة	COP 4-6+	عالية مع Water-Cooled
مرونة التركيب	عالية	أقل
التحكم الفردي	كل وحدة مستقلة	ممكن مع Terminal Valves
التطبيقات	فنادق، مكاتب، مبانٍ متوسطة	مبانٍ ضخمة، مستشفيات

8.2 أنواع أنظمة VRF

1. **Cooling Only:** تبريد فقط
2. **Heat Pump VRF:** تبريد أو تدفئة (ليس معاً في نفس الوقت)
3. **Heat Recovery VRF:** — تبريد وتدفئة في نفس الوقت بوحدات مختلفة الأكثر كفاءة

القسم التاسع: أنظمة التحكم والأتمتة

Control Systems & Automation

9.1 أنواع أجهزة التحكم

نوع التحكم	التطبيق
Thermostat	المنازل، غرف التبريد البسيطة
Pressure Control	حماية النظام + تنظيم التشغيل
Electronic Controllers	وحدات تجارية وصناعية
DDC Direct Digital Control	أنظمة BMS المتكاملة
PLC	مصانع التبريد — عمليات معقدة
BMS Building Management System	المباني الكبيرة — مراقبة مركزية

9.2 تحكم السعة — Capacity Control

طريقة التحكم	التطبيق
On/Off Control	أجهزة صغيرة
Cylinder Unloading	ضواغط ترددية كبيرة
Hot Gas Bypass	تحكم خطي — يُقلل الكفاءة
Slide Valve	ضواغط Screw
VFD / Inverter	الأكثر كفاءة — الحل الأمثل
Multiple Compressors Staging	Chiller Plants

9.3 تسلسل تشغيل الشيلر — Sequence of Operations

1. Pre-Start Check: ضغط الشفط — ضغط الزيت — Crankcase Heater
2. CHW Pump Start + التحقق من التدفق بـ Flow Switch

3. CW Pump Start
4. Cooling Tower Start
5. Compressor Start — في السعة الدنيا
6. Capacity Control حسب درجة الماء المبرد
7. Shutdown: الضاغط أولاً — ثم البرج — ثم المضخات

القسم العاشر: النظام الكهربائي

Electrical System

10.1 بدايات الضاغط — Compressor Starters

نوع البداية	التيار عند التشغيل	التطبيق
DOL Direct On Line	6-8x FLA	محركات صغيرة < 5 kW
Star-Delta Y-Δ	أقل	محركات 5-75 kW
Soft Starter	تدريجي	محركات متوسطة وكبيرة
VFD Inverter	الأفضل تحكماً وكفاءةً	الأنظمة الحديثة

10.2 الحماية الكهربائية

- **Thermal Overload Relay:** يقيس الحرارة الناتجة عن التيار الزائد
- **Phase Loss Protection:** فقدان فاز واحد يحرق المحرك سريعاً
- **Phase Imbalance:** اختلال > 2% → تسخين زائد
- **Phase Reversal:** يُدمر الضاغط اللولبي

سخّان الكارتر [Crankcase Heater]:

يمنع تمركز المبرد في الزيت أثناء التوقف. **يجب إبقاؤه مشغولاً دائماً عند إيقاف الجهاز.**

القسم الحادي عشر: نظام الزيت والتزييت

Oil System & Lubrication

11.1 وظائف الزيت

1. التزييت [Lubrication] — تقليل الاحتكاك
2. التبريد [Cooling] — نقل الحرارة من الأجزاء الداخلية
3. الإحكام [Sealing] — سد الفجوات
4. التنظيف [Cleaning] — حمل الجسيمات الصغيرة

11.2 أنواع الزيت

نوع الزيت	المبردات المناسبة	الخاصية
Mineral Oil (MO)	R22, R717	رخيص
Alkylbenzene (AB)	R22, R717	بديل محسّن
POE — Polyolester	R134a, R410A, R404A	يتشرب — HFC ضروري لـ الرطوبة
PAO	R717 (أمونيا)	لا يُستخدم مع HFC

> ⚠ **تحذير:** خلط أنواع مختلفة من الزيت ممنوع تماماً.

11.3 التلوث الحمضي — Acid Contamination

Acid Test Kit: يقيس Total Acid Number (TAN)

- TAN > 0.05 mgKOH/g = خطر — يجب تغيير الزيت
- TAN > 0.1 = ضرورة غسيل النظام [System Flush]

القسم الثاني عشر: مفاهيم الهواء والماء

Airflow & Water Flow Concepts

12.1 قوانين المراوح والمضخات — Fan & Pump Laws

$Q_2/Q_1 = n_2/n_1$ (التدفق)
$P_2/P_1 = (n_2/n_1)^2$ (الضغط)
$W_2/W_1 = (n_2/n_1)^3$ (الطاقة)

> ✦ **قانون التكعيب:** تخفيض السرعة 20% يوفر $(0.8)^3$ = **51.2% من الطاقة** — سر التوفير الكبير بالـ VFD.

القسم الثالث عشر: علم الرطوبة والهواء — Psychrometrics

13.1 المصطلحات الأساسية

المصطلح	التعريف	الأهمية
Dry Bulb Temperature DBT	درجة الحرارة المقاسة بمقياس عادي	المرجع الأساسي لأداء النظام
Wet Bulb Temperature WBT	درجة الحرارة بمقياس رطب	كفاءة برج التبريد
Dew Point نقطة الندى	درجة بداية التكثف	تحديد درجة حرارة سطح المبخر
Relative Humidity RH%	نسبة بخار الماء الفعلي	الراحة البشرية: 40-60%
Specific Humidity ω	وزن بخار الماء [g/kg]	حسابات الحمل الكامن
Sensible Heat Ratio SHR	نسبة الحمل الحسّي للكلي	تحديد نوع وحدة المعالجة

شروط الراحة البشرية [ASHRAE 55]:

- Dry Bulb: 20°C — 26°C (صيف)
- Relative Humidity: 30% — 60%
- نقطة الندى: 11°C — 16°C

القسم الرابع عشر: برنامج الصيانة الوقائية

Preventive Maintenance Program

14.1 الصيانة اليومية — Daily Maintenance

المهمة	الأداة	القيمة الطبيعية	الإجراء عند الانحراف
قراءة ضغط الشفط والطرد	Manifold Gauge	حسب جداول المبرد	مقارنة بالسجلات — تحقيق فوري
قياس درجة حرارة الشفط والطرد	Contact Thermometer	حسب المصنع	حساب SC و SH
فحص Sight Glass	عين مباشرة	سائل نظيف — مؤشر أخضر	فقاعات = نقص — أصفر = رطوبة
الاستماع لصوت الضاغط	أذن مدربة / سماعة	هادئ ومنتظم	صوت غير طبيعي = إيقاف وفحص
فحص لوحة التحكم	فحص بصري	لا إنذارات نشطة	أي ضوء تحذير = تشخيص فوري
مستوى الزيت	نافذة فحص	ضمن العلامات	نقص = تحقيق من مصدره

14.2 الصيانة الأسبوعية — Weekly Maintenance

المهمة	ملاحظات
تنظيف الفلاتر الهوائية لـ AHU/FCU	تأثير مباشر على الكفاءة
فحص توترات سيور القيادة [Belt Drives]	ترهل أو شد مفرط كلاهما ضار
فحص وتشحيم محامل الرياح [Fan Bearings]	اهتزاز مرتفع يسبق العطل

المهمة	ملاحظات
فحص تصريف الكوندنسيت [Condensate Drain]	انسداد = تسرب ماء داخل الوحدة
مراجعة الإنذارات والتسجيلات	الأعطال المتكررة تكشف جذر المشكلة

14.3 الصيانة الشهرية — Monthly Maintenance

المهمة	ملاحظات هندسية
قياس SH و SC وتحليل الاتجاه	الانحراف المستمر = مشكلة تحتاج تشخيص
قياس تيار الضاغط وجهد الخطوط	ارتفاع التيار عن الاعتيادي = تحذير
فحص المكثف الهوائي: نظافة + ΔT الهواء	ΔT المكثف كاشف لكفاءة الانتقال
فحص دورات الإذابة [Defrost Cycles]	إذابة ناقصة = جليد متراكم
فحص الصمامات الملفية [Solenoid Valves]	صمام عالق يتسبب في مشاكل
فحص مستوى الزيت وحالته	تلوث الزيت يسبق عطل الضاغط

14.4 الصيانة الربع سنوية — Quarterly Maintenance

المهمة	ملاحظات
تنظيف ملف المكثف بغسيل عالي الضغط	Fin Comb = الزعانف المنحنية لإصلاحها
تنظيف ملف المبخر	الرواسب ترفع SH وتقلل كفاءة

المهمة	ملاحظات
اختبار مفاتيح الضغط العالي والمنخفض	محاكاة ضغط منخفض وعالٍ
فحص وتنظيف ألواح الاتصال [Contactors]	نقاط المحروقة تسبب ارتفاع المقاومة
معايرة أجهزة التحكم وضبط نقاط الضبط	الانجراف التراكمي يؤثر الأداء
فحص وإحكام التوصيلات الكهربائية	التوصيلات المفكوكة = سبب رئيسي للحرائق
فحص عزل أنابيب المبرد	العزل التالف = كسب حرارة = ضعف كفاءة

14.5 الصيانة السنوية — Annual Maintenance

المهمة	التفاصيل
تحليل زيت الضاغط في المختبر	اللزوجة — الحموضة — الرطوبة — المعادن
Megger Test للموتور	خطر وشيك MΩ 1 > — مقبولة 100 MΩ >
غسيل عميق للمبادلات الحرارية	Chemical Flush للشيلرات
استبدال Filter Drier	المُجفّف المشبع = رطوبة تعود للنظام
معايرة جميع أجهزة الاستشعار	الانجراف التراكمي يؤثر الأداء
فحص شامل للتسربات	Electronic Leak Detector + UV Dye
مراجعة الامتثال البيئي	توثيق كميات المبرد
تقرير صيانة سنوي كامل	قاعدة بيانات تاريخ الجهاز

القسم الخامس عشر: استكشاف الأعطال

Troubleshooting & Failure Analysis

15.1 جدول استكشاف الأعطال الشامل

العَرَض / Symptom	الأسباب المحتملة	طريقة التشخيص	الإجراء التصحيحي
ضغط الطرد عالٍ جداً	مكثف متسخ — هواء محاصر — مبرد زائد — تدفق ضعيف	قياس ΔT — المكثف فحص التدفق	تنظيف المكثف — Purge — تعديل الشحن
ضغط الشفط منخفض جداً	نقص مبرد — انسداد TXV — مبخر متجمد — انسداد Drier	نقص SH = عالٍ طبيعي SH — مبرد = مبخر متجمد	شحن المبرد — إذابة — استبدال Drier أو TXV
الضاغط لا يبدأ	مشكلة كهربائية — Pressure Trip — كسر ميكانيكي	فحص الفولت — قراءة Relays — Alarm	إصلاح الكهرباء — إعادة ضبط الإنذار
تبريد غير كافٍ	مبرد — مبخر — تحكم — تهوية — حمل زائد	مقارنة الأداء الفعلي بالمطلوب — SH و SC	تشخيص منهجي
مرتفع جداً SH 15 <°C	نقص مبرد — TXV مغلق — تالفة TXV بلبة	قياس الضغط وحرارة الشفط	شحن المبرد — ضبط أو استبدال TXV

العَرَض / Symptom	الأسباب المحتملة	طريقة التشخيص	الإجراء التصحيحي
SH منخفض / Floodback < 3°C	TXV مفتوح — شحن زائد — EEV مفتوح	قياس SH — تيار الضاغط (يرتفع)	ضبط TXV — تقليل الشحن
ارتفاع حرارة الطرد > 120°C	SH مرتفع — ضغط تكثيف عالٍ — صمامات تالفة	قياس حرارة خط الطرد	تصحيح SH — إصلاح المكثف
تراكم الجليد على المبخر	نقص تدفق الهواء — دورة إذابة معطوبة	فحص الفلاتر والمراوح	تنظيف الفلاتر — إصلاح الإذابة
تسرب المبرد	تآكل — اهتزاز — تركيب خاطئ	جهاز كشف إلكتروني — UV Dye	إصلاح — تفريغ — إعادة الشحن
رطوبة في النظام	دخول هواء عند الشحن — Drier مشبع	Sight Glass أصفر	استبدال Drier — تفريغ عميق
Short Cycling	حمل صغير — Pressure Switch يقطع	سجل دورات التشغيل	ضبط Pressure Switches
ضوضاء في الضاغط	صدم سائل — تآكل محامل — Slugging	Stethoscope — SH — الزيت	تصحيح السيولة — صيانة داخلية
هواء في النظام	تفريغ غير كافٍ — تسرب في الجانب المنخفض	ضغط الطرد مرتفع غير طبيعي	استرداد — تفريغ عميق — إعادة الشحن

العَرَض / Symptom	الأسباب المحتملة	طريقة التشخيص	الإجراء التصحيحي
احتراق الموتور	تيار زائد متكرر — رطوبة — Liquid Slugging	Megger Test — رائحة حرق	تبديل الضاغط — غسيل النظام

15.2 منهجية تشخيص الأعطال — Diagnostic Methodology

1. **جمع المعلومات [Information Gathering]:** تاريخ العطل — سجلات الصيانة
2. **قياس القيم الحالية [Take Readings]:** ضغط — SH — SC — درجات حرارة — تيار
3. **المقارنة [Compare with Normal]:** السجلات السابقة — جداول المصنع
4. **تكوين فرضيات [Form Hypotheses]:** قائمة الأسباب حسب الأولوية
5. **اختبار الفرضيات [Test Hypotheses]:** فحوصات موجهة
6. **التشخيص والإصلاح [Diagnose & Repair]:** السبب الجذري [Root Cause]
7. **التحقق والتوثيق [Verify & Document]:** التأكد من عودة الأداء الطبيعي

القسم السادس عشر: الحسابات الهندسية

Engineering Calculations

16.1 حساب الحمل الحراري — Heat Load Calculation

مصدر الحرارة	المعادلة	ملاحظات
كسب عبر الجدران [Transmission]	$Q = U \times A \times \Delta T$	U = معامل انتقال الحرارة الكلي [W/m²K]
التهوية الحسية	$Q_s = \dot{m} \times Cp \times \Delta T$	$\dot{m}$ = معدل تدفق الهواء [kg/s]
التهوية الكامنة	$Q_l = \dot{m} \times h_{fg} \times \Delta\omega$	$\Delta\omega$ = اختلاف الرطوبة النوعية
حرارة الأشخاص	$Q = n \times q_{person}$	q = 90-120 W/ شخص
حرارة الإضاءة	$Q = W_{lighting} \times CLF$	CLF = 0.7-1.0
حرارة المعدات	$Q = W_{equipment} \times UF \times CLF$	UF = Usage Factor
كسب الحرارة الشمسي	$Q = SC \times SHGC \times A \times CLF$	يعتمد على اتجاه الواجهة

Q_total = Q_wall + Q_roof + Q_glass + Q_ventilation + Q_occupants + Q_lights + Q_equipment + Q_solar

---

16.2 حسابات المبرد

الكمية	المعادلة	وحدة	ملاحظة
تأثير التبريد	$RE = h_1 - h_4$	kJ/kg	h من جداول المبرد

الكمية	المعادلة	وحدة	ملاحظة
معدل تدفق المبرد	$\dot{m} = Q_{evap} / RE$	kg/s	—
شغل الضاغط	$W = \dot{m} \times (h_2 - h_1)$	kW	—
الحرارة المرفوضة	$Q_{cond} = \dot{m} \times (h_2 - h_3)$	kW	$Q_{cond} = Q_{evap} + W_{comp}$
COP	$COP = Q_{evap} / W_{comp}$	—	كلما ارتفع كلما كان أفضل
السعة بالطن	$TR = Q_{evap}$ [kW] / 3.517	TR	1 TR = 3.517 kW
COP كارنو	$COP_{Carnot} = T_L / (T_H - T_L)$	—	T بالكلفن

16.3 مثال حساب SH وSC ميدانياً

البيانات — نظام R410A:

- ضغط الشفط (Gauge) = 7 Bar → ضغط مطلق = 8.013 Bar
- درجة حرارة خط الشفط = 8+°C
- ضغط الطرد (Gauge) = 24 Bar → ضغط مطلق = 25.013 Bar
- درجة حرارة خط السائل = 32+°C

الحساب:

من جداول R410A:
T_sat 8 عند Bar (Abs) ≈ -7°C
Superheat = 8°C - (-7°C) = 15°C ← مرتفع (10-5 :الطبيعي°C)

T_sat 25 عند Bar (Abs) ≈ +34°C
Subcooling = 34°C - 32°C = 2°C ← منخفض (10-5 :الطبيعي°C)

التشخيص: SH مرتفع + SC يحتاج مبرد إضافي — **شحن ناقص** = منخفض.

16.4 قوانين المراوح والمضخات — Fan & Pump Laws

$Q_2/Q_1 = n_2/n_1$ (التدفق)
$H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2$ (الضغط)
$P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3$ (الطاقة)

> ✦ **مثال:** تخفيض سرعة المروحة من 1500 إلى 1200 RPM (80%)
> الطاقة تنخفض = $(1200/1500)^3 = (0.8)^3 = 0.512$ ← **توفير 48.8% من الطاقة**

القسم السابع عشر: السلامة والمعايير الدولية

Safety, Standards & Codes

17.1 مخاطر العمل في أنظمة التبريد

نوع الخطر	الوصف	وسائل الحماية
الضغط العالي [High Pressure]	انفجار مفاجئ — إصابات بالغة أو وفاة	لا تفك وصلة بدون تفريغ الضغط
القطع البادر [Frostbite]	تماس مع المبرد السائل — حروق بادرة	قفازات عازلة — نظارات
اختناق الأكسجين [O_2 Displacement]	المبردات تتراكم وتُزيح الأكسجين	O_2 مستشعرات — تهوية جيدة
سمية الأمونيا [NH_3 Toxicity]	حد التعرض 25 ppm TLV	SCBA — مستشعرات NH_3
مخاطر كهربائية	الصعق — حرائق	LOTO — أرضة صحيحة — PPE
قابلية الاشتعال	R290, R32, R717 قابلة للاشتعال	أدوات مضادة للشرارة

17.2 تصنيف سلامة المبردات — ASHRAE 34

الفئة	السمية	قابلية الاشتعال	أمثلة
A1	منخفضة	لا يشتعل	R134a, R410A, R407C
A2L	منخفضة	قابل للاشتعال بصعوبة	R32, R1234yf
A2	منخفضة	قابل للاشتعال	R152a
A3	منخفضة	قابل للاشتعال بشكل كبير	R290, R600a
B2	مرتفعة	قابل للاشتعال	R717 (أمونيا)

17.3 إجراء LOTO — Lockout/Tagout

1. إخطار العمليات والمشرفين
2. إيقاف الجهاز من التحكم الرئيسي
3. فصل الطاقة الكهربائية من المفتاح الرئيسي
4. تثبيت **Padlock** على المفتاح الرئيسي
5. تعليق **Tag** بالاسم والسبب والوقت
6. التحقق من الفصل بـ Voltmeter
7. تفريغ الضغط من منطقة العمل
8. عند الانتهاء: رفع القفل — إخطار العمليات — تشغيل تدريجي

17.4 المعايير الدولية الرئيسية

المعيار	الجهة	المجال
ASHRAE 15	ASHRAE	Safety Standard for Refrigeration Systems
ASHRAE 34	ASHRAE	تصنيف المبردات ودرجة سلامتها
ASHRAE 90.1	ASHRAE	معايير كفاءة الطاقة للمباني
AHRI 550/590	AHRI	اختبار وتقييم أداء الشيلرات
EN 378	European Standard	معيار السلامة الأوروبي
ISO 5149	ISO	المتطلبات الأمنية والبيئية
Montreal Protocol 1987	UNEP	جدول إلغاء CFC — حظر مبردات HCFC

المعيار	الجهة	المجال
Kigali Amendment 2016	UNEP	خفض HFCs بنسبة 80-85% بحلول 2047
F-Gas Regulation (EU)	الاتحاد الأوروبي	تنظيم استخدام HFCs

القسم الثامن عشر: الكفاءة الطاقية والتحسين

Energy Efficiency & Optimization

18.1 استراتيجيات توفير الطاقة

الاستراتيجية	وصف العمل	نسبة التوفير	التطبيق
Floating Head Pressure	السماح لضغط الطرد بالانخفاض في الطقس البارد	5 — 20%	أنظمة هوائية
VFD على الضاغط والمراوح والمضخات	ضبط السرعة حسب الحمل الفعلي	15 — 40%	جميع الأنظمة الكبيرة
Free Cooling	استخدام الهواء البارد دون تشغيل الضاغط	30 — 80%	الطقس المعتدل والبارد
Flash Economizer	تبريد جزء من المبرد السائل — رفع COP	5 — 15%	ضواغط Screw وCentrifugal

الاستراتيجية	وصف العمل	نسبة التوفير	التطبيق
Heat Recovery	استخدام حرارة المكثف لتسخين الماء الساخن	كبير جداً	فنادق، مستشفيات
نظافة المبادلات الحرارية	انخفاض في 1°C التكثيف = ~3% توفير	5 — 15% تراكمي	جميع الأنظمة
الشحن الصحيح للمبرد	الشحن الصحيح يرفع COP	3 — 10%	جميع الأنظمة

18.2 مؤشرات قياس الكفاءة

المؤشر	التعريف	القيم الجيدة
COP	Q_evap / W_comp	Chiller: 4-7+ / Room AC: 3-5
EER	BTU/hr / Watt = COP × 3.412	جيد > 11 / ممتاز > 14
SEER	كفاءة الموسم الكامل	ممتاز > 16
IPLV	متوسط COP مرجّح عند أحمال جزئية	مهم للأحمال المتغيرة
kW/TR	3.517 / COP	جيد < 0.8-0.6 / ممتاز < 0.6

القسم التاسع عشر: الممارسات الصناعية الواقعية

Real Industrial Practices

19.1 الأخطاء الشائعة في المنشآت الكبيرة

الخطأ الشائع	الأثر	الحل الهندسي
الشحن الخاطئ للمبرد	ضعف الأداء — تلف الضاغط	وزن المبرد + SH/SC
إهمال تنظيف المكثف	ارتفاع ضغط الطرد — +15-20% استهلاك	تنظيف دوري ربع سنوي
ضعف التهوية حول المكثف	Hot Air Recirculation	مسافات إزاحة كافية
إهمال معالجة مياه برج التبريد	Scaling — Legionella — تآكل	برنامج معالجة مياه محترف
تركيب أنابيب غلط	مشاكل عودة الزيت — فقد الضغط	مواصفات المصنع والكودات
استخدام زيوت غير متوافقة	تلف الضاغط سريعاً	التأكد من التوافق قبل أي إضافة

19.2 الصيانة المرتكزة على الموثوقية — RCM

- **Preventive:** جداول دورية ثابتة
- **Predictive:** تحليل الاهتزاز — تحليل الزيت — Thermography
- **Condition-Based:** الصيانة عند الحاجة الفعلية
- **Root Cause Analysis (RCA):** لكل عطل رئيسي — لمنع التكرار

19.3 القطع الاحتياطية الحيوية — Critical Spare Parts

- Filter Drier

- Solenoid Valve Coil
- Contactor + Overload Relay
- Sight Glass + Pressure Gauges
- Capacitors للمحركات المفردة الطور
- Belts (سيور المراوح والمضخات)
- محامل المراوح [Fan Bearings]

القسم العشرون: قوائم الفحص الميداني

Field Inspection Checklists

20.1 قائمة الفحص اليومية

✓	بند الفحص	القراءة/ المشاهدة	الحد الطبيعي
☐	ضغط الشفط [Suction Pressure]	_____ Bar	حسب المبرد وظروف التشغيل
☐	ضغط الطرد [Discharge Pressure]	_____ Bar	حسب المبرد وظروف التشغيل
☐	درجة حرارة الشفط	_____ °C	حسب ضغط الشفط + SH
☐	درجة حرارة الطرد	_____ °C	< 120°C اعتيادياً
☐	Superheat محسوب	_____ °C	5°C — 10°C
☐	Subcooling محسوب	_____ °C	5°C — 10°C

✓	بند الفحص	القراءة/ المشاهدة	الحد الطبيعي
☐	حالة Sight Glass	سائل/فقاعات/ رطوبة	سائل نظيف — مؤشر أخضر
☐	Chilled Water Supply (إن وُجد)	_____ °C	6°C — 7°C
☐	Chilled Water Return (إن وُجد)	_____ °C	11°C — 13°C
☐	تيار الضاغط [Compressor Amps]	_____ A	حسب ورقة البيانات
☐	أصوات الضاغط	طبيعي / غير طبيعي	هادئ ومنتظم
☐	مؤشرات لوحة التحكم	طبيعية / إنذارات	لا إنذارات نشطة
☐	مستوى الزيت	ضمن العلامة	لا نقص
☐	حالة عزل أنابيب الشفط	تكثف / تلف / سليم	جاف وسليم

20.2 قائمة فحص الصيانة السنوية

✓	المهمة السنوية	الفني المنفذ	التاريخ
☐	تنظيف عميق لملف المكثف — غسيل كيميائي		
☐	تنظيف عميق لملف المبخر		
☐	اختبار Megger ≥ 100 MΩ للموتور		

✓	المهمة السنوية	الفني المنفذ	التاريخ
☐	تحليل مختبري لعينة زيت الضاغط		
☐	استبدال Filter Drier		
☐	اختبار واعتماد مفاتيح الضغط		
☐	فحص وإحكام التوصيلات الكهربائية		
☐	قياس مستوى المبرد وبحث التسربات		
☐	معايرة أجهزة الاستشعار والمتحكمات		
☐	فحص منظومة الإذابة كاملة		
☐	اختبار أنظمة الحماية الكاملة		
☐	توثيق تقرير الصيانة السنوية		

القسم الحادي والعشرون: الخلاصة والتوصيات

Conclusion & Best Practices

21.1 المفاهيم الأكثر أهمية

#	المفهوم الحرج	لماذا هو حرج
1	علاقة الضغط-درجة الحرارة [P-T Relationship]	أساس تشخيص كل مشكلة في الموقع
2	Superheat & Subcooling	مؤشران حيويان لحالة الشحن وسلامة الضاغط

#	المفهوم الحرج	لماذا هو حرج
3	حماية الضاغط [Compressor Protection]	أغلى مكوّن — الإخفاق في حمايته خسارة كبيرة
4	نظافة المبادلات الحرارية	مكثف متسخ يرفع التشغيل 15-20%
5	الشحن الصحيح للمبرد	الشحن الخاطئ يُقلل الكفاءة ويُخاطر بالضاغط
6	معالجة مياه برج التبريد	إهمالها يُدمر المبادلات وينمّي الليجيونيلا
7	السلامة أولاً [Safety First]	مستشعرات — لا — LOTO — PPE اختصار في السلامة

21.2 أهم الأعطال الشائعة

- **تسرب المبرد [Refrigerant Leak]:** السبب الأول لانخفاض الأداء
- **مكثف متسخ [Dirty Condenser]:** يرفع ضغط الطرد ويُقلل COP تراكمياً
- **فلاتر هواء متسخة [Dirty Air Filters]:** تُقلل التدفق وتُسبب تجمد المبخر
- **معطوب أو مضبوط غلط:** أداء سيئ أو خطر على الضاغط **TXV**
- **مشاكل كهربائية:** اتصالات مفكوكة — تيار غير متوازن
- **مشاكل الزيت:** تلوث — نقص — عدم العودة من الدورة

21.3 كيفية إطالة عمر النظام

1. **برنامج صيانة وقائية منضبط:** اتبع الجداول اليومية والأسبوعية والشهرية والسنوية بدقة
2. **التوثيق المستمر:** سجّل كل قراءة وكل إجراء — الاتجاهات تكشف المشاكل مبكراً

3. **تحليل الاتجاهات [Trend Analysis]:** مقارنة القراءات الحالية بالسابقة
4. **التدريب المستمر:** كفاءة الفريق = كفاءة النظام
5. **الاستثمار في أجهزة الكشف:** BMS — إنذارات مبكرة — مستشعرات
6. **احترام حدود التشغيل:** لا تُشغّل الجهاز خارج مواصفات المصنع
7. **التعامل الفوري مع الأعطال الصغيرة:** العطل الصغير المهمل يتحوّل لكارثة كبيرة

> ✦ **الهدف النهائي لكل مهندس تبريد:** الحصول على أقصى أداء تبريدي بأدنى استهلاك طاقة وأعلى موثوقية تشغيل وأطول عمر ممكن للنظام — هذا يتحقق فقط بالمعرفة الهندسية العميقة والصيانة الوقائية المنضبطة.

— نهاية المرجع الهندسي الشامل لدورة التبريد وأنظمة التبريد —

Refrigeration Cycle & Refrigeration Systems — Complete Engineering Reference